http://pmse.scu.edu.cn

计及温度与应变率效应的超高分子量聚乙烯纤维束的拉伸力学性能

辛 振[1,2]，沈超明[1]

（1. 江苏科技大学 船舶与海洋工程学院，江苏 镇江 212000；2. 中船澄西（泰州）装备科技有限公司，江苏 泰州 214514）

摘要：文中针对超高分子量聚乙烯（UHMWPE）纤维束在计及温度（−60~80 ℃）和应变率（1×10^{-5}~3.3×10^{-2} s^{-1}）的25种工况下，基于轴向拉伸实验数据，研究了UHMWPE纤维束力学性能的温度和应变率效应及其破坏模式。结果表明，UHMWPE纤维束的力学性能具有一定的应变率和温度效应，但后者具备更为强大的影响力，其使UHMWPE纤维束在温度高于50 ℃时强度产生显著下降；此外，低温在提升UHMWPE纤维束拉伸强度的同时也会削弱其力学性能的应变率效应，在−40～−60 ℃范围内，UHMWPE纤维束拉伸强度和失效应变基本不受应变率影响。在UHMWPE纤维束的损伤破坏模式研究中发现，在脆-韧性转变存在的温度区间内（25~80 ℃），转变发生的临界应变率与温度之间具有密切联系，温度每升高约30 ℃，临界应变率就会提升1个量级。

关键词：超高分子量聚乙烯纤维束；温度效应；应变率效应；脆-韧性转变；临界应变率

中图分类号：TQ342^{+}.61　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-7555(2024)03-0118-07

在能源枯竭问题日益严峻的大环境下，诸多领域对各类工程材料的性能提出了更加苛刻的要求，相关材料在满足轻便、节能的同时还应具有良好的力学性能，如弹塑性性能、抗冲击性能、硬度等，复合材料因此应运而生。作为复合材料中最重要的增强体，超高分子量聚乙烯（UHMWPE）纤维吸能强、比强度高、比模量大等优点在改善复合材料性能中起着至关重要的作用，由其制造的高性能轻质复合材料在现代化战争中显示出极大优势，不仅在航空、航天、海洋防御装备等领域发挥着举足轻重的作用[1]，而且在民用、体育及医学领域也有着极大的发展前景[2]。因此，对UHMWPE纤维力学性能开展深入研究具有重要的实际意义。

对UHMWPE等高性能纤维的研究兴起于上个世纪90年代，研究内容主体上大致分为2类：一是本构关系；二是力学性能表征。夏源明课题组通过实验揭示了纤维束及其复合材料力学性能的应变率、温度相关性[3]，通过冲击加卸载试验以及能量分析和瞬态温升测试，提出了热弹脆性损伤的理论框架，在此基础上，建立了纤维应变率相关、温度相关的单-双参数Weibull统计本构模型和相应的纤维束弹脆性损伤本构模型，并且从理论和实验2个方面揭示了纤维强度的离散性与应变率和温度无关。在力学性能表征方面，Kromm等对型号Dyneema SK75的UHMWPE纤维在室温至150 ℃的温度范围内进行了准静态和蠕变拉伸实验，发现其力学性能具有非常明显的温度效应[4]。Coline等对型号为Doyentrontex的UHMWPE纱线进行了加卸载和蠕变拉伸试验[5]，结果表明，其蠕变性能高度依赖于温度和时间。除去上述两大主体，关于UHMWPE纤维的其他研究还包括实验工装及夹持方法[6,7]、热处理[8]及数值模拟[9]等。温度和应变率作为共同影响材料

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0042
收稿日期：2023-05-12
基金项目：军队后勤开放研究科研项目；镇江市重点研发计划（GZ2018005）
通讯联系人：沈超明，主要从事复合材料力学行为、结构抗冲击性能与防护方面的研究，E-mail: scm0905@sina.com

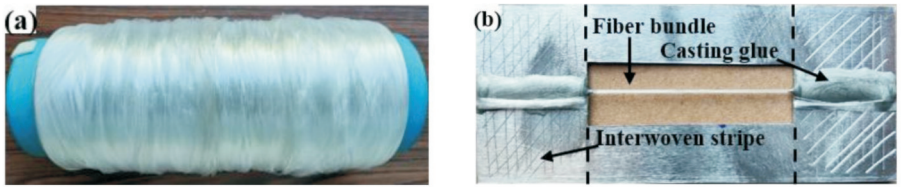


Fig. 1 (a) UHMWPE fiber bundle raw material; (b) 50 mm UHMWPE fiber bundle sample

Tab. 1 Mechanical property parameters of UHMWPE single fiber

Sample name	Tensile strength /(cN·dtex^{-1})	Elastic modulus /(cN·dtex^{-1})	Failure strain /%	Volume density /(g·cm^{-3})
UHMWPE	39.2	1.49×10^{3}	4.66	0.97

力学性能的2个至关重要的因素，就目前对UHMWPE纤维力学性能表征的主体研究内容来看，多数研究仅计及了应变率或温度对力学性能的单独影响，而忽略了二者的协同作用，这显然与UHMWPE纤维所承受的实际工况不符。

本文基于轴向拉伸实验，在涉及不同应变率（1×10^{-5}~3.3×10^{-2} s^{-1}）和温度（−60~80 ℃）的25种工况下进行了超过120次测试，全面研究了UHMWPE纤维束力学性能的应变率和温度效应及其破坏模式，得到了UHMWPE纤维束产生脆-韧性转变的临界应变率与温度之间的关系。本文创新点在于考虑了温度和应变率对UHMWPE纤维束力学性能的协同影响，研究结果可为探究影响UHMWPE纤维束力学性能和损伤破坏模式的临界工况提供参考，亦可为以UHMWPE纤维束为主要增强体的复合材料的使用提供依据。

1　实验部分

1.1　试样与实验设备

UHMWPE纤维束原料(Fig.1(a))由湖南中泰特种装备有限责任公司制造，依据国标GB/T 19975-2005所测其单丝物理参数见Tab.1。采用一种针对纤维束的试样制备方法[10]，该方法可有效防止夹持过程中因应力集中而导致的纤维束试样根部剪切断裂以及由于UHMWPE表面附着性较差而引起的拉伸过程中的纤维拉拔，由该方法制备的50 mmUHMWPE纤维束试样如Fig.1(b)所示，实验时将试样沿虚线剪断。

本文加载装置采用深圳三思纵横科技股份有限公司生产的精度为0.5级的UTM5105型电子万能试验机，温控装置采用无锡惠尔生产的温度范围−60~200 ℃的HGD-105型温控箱，传感装置为美国传力公司生产的Transcell-5 kN力传感器。为尽量减少温度对传感器的影响，为试验机配备了一套由冷却水箱、水泵、冷却水管构成的冷却系统，整套高低温实验系统如Fig.2所示。

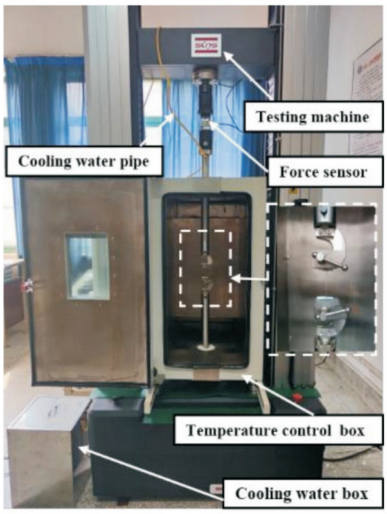


Fig. 2 Test system

1.2　数据处理方法

除25 ℃，1×10^{-5} s^{-1}工况外（3次实验），对其余24种工况均进行了5次及以上的实验，数据处理时，去除每种工况下多组力-位移数据中的最大组和最小组，对剩余组力-位移数据进行平均化处理，得到各工况下具有代表性的力-位移曲线；1×10^{-5} s^{-1}的代表性曲线则直接由3条力-位移曲线平均化得到。需要注意的是，本文应变率工况的选取主要考虑如下2个方面：(1)跨量级；(2)控制拉伸时的加速度。3.3×

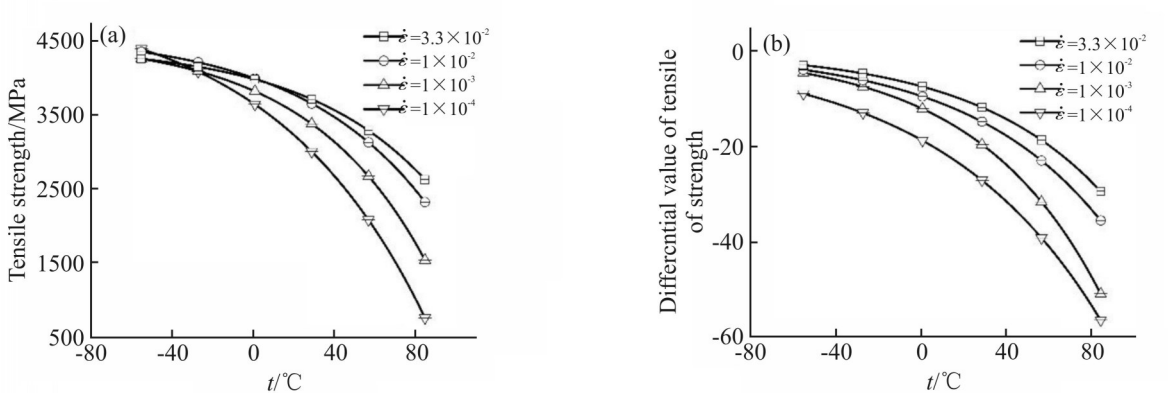


Fig. 3 (a) Tensile strength-temperature and (b) differential curves

Tab. 2 Experimental data of tensile strength under various conditions MPa

Temperature/℃	Strain rate/s^{-1}			
	1×10^{-4}	1×10^{-3}	1×10^{-2}	3.3×10^{-2}
- 60	4292.91	4195.36	4290.15	4254.63
- 40	4253.72	4193.94	4306.93	4208.12
- 10	3727.84	3840.50	4022.53	4006.30
25	3197.97	3490.91	3740.29	3853.57
50	1874.14	2555.71	3048.29	3197.49
80	812.27	1559.81	2338.57	2634.23

10^{-2} s^{-1}没有跨量级的原因是该工况的加载速度为100 mm/min，如若跨量级则加载速度将达到300 mm/min，此时加速度会对实验结果的准确性产生较大影响。

为提高实验数据的可靠性，正式实验前需对纤维束试样施加一定水平的预加张力以达到预拉退卷的目的，预加张力值（F_p）根据国标GB/T 19975-2005由式(1)确定

$$F_p = F_1 \pm F_2 \tag{1}$$

式中：F_1，F_2宜分别取0.05 cN/dtex，0.01 cN/dtex。实验采集到的力-位移数据可通过式(2)、式(3)转化为应力-应变数据

$$\sigma = F/\rho_1 \times \rho_2 \tag{2}$$

$$\varepsilon = d/L_s \tag{3}$$

式中：F，ρ_1和ρ_2——分别为载荷、线密度（444 dtex）和体密度（97 kg/m^3）；d和L_s——分别为试样变形和试样长度，由于UHMWPE纤维束的刚度远小于试验机横梁刚度，因此可将横梁位移近似为试样变形[11]。

2 结果与讨论

2.1 拉伸强度分析

Tab.2为各工况拉伸强度的实验数据，由表中数据绘制的拉伸强度-温度曲线见Fig.3(a)。如Fig.3(a)所示，UHMWPE纤维束拉伸强度随温度升高而降低，其衰减趋势具有明显的指数特征。为使这种衰减趋势得到量化，对Fig.3(a)中曲线进行微分处理，微分曲线见Fig.3(b)，此图反映了拉伸强度-温度曲线斜率的变化情况，由该图可知，拉伸强度随温度的衰减速度受应变率影响，应变率越高，衰减速度越慢。以Fig.3(b)中，3.3×10^{-2} s^{-1}应变率所对应的曲线为例，该曲线在某一给定温度下的微分值始终大于其余三者，这表明在此应变率下，拉伸强度随温度升高时的衰减速度要小于其余三者，也意味着UHMWPE纤维束的温度效应在一定程度上会受到应变率的影响。

为进一步探究温度对各应变率下UHMWPE纤维束拉伸强度的影响，以25 ℃时各应变率工况所对应的拉伸强度作为基准值得到Tab.3，表中带有“–”

Tab. 3 Improvement of tensile strength relative to 25 ℃　%

Temperature/℃	Strain rate/s^{-1}			
	1×10^{-4}	1×10^{-3}	1×10^{-2}	3.3×10^{-2}
−60	34.24	20.18	14.70	10.41
−40	33.01	20.14	15.15	9.20
−10	16.57	10.01	7.55	3.96
50	−41.40	−26.80	−18.50	−17.44
80	−74.60	−55.32	−37.48	−31.64

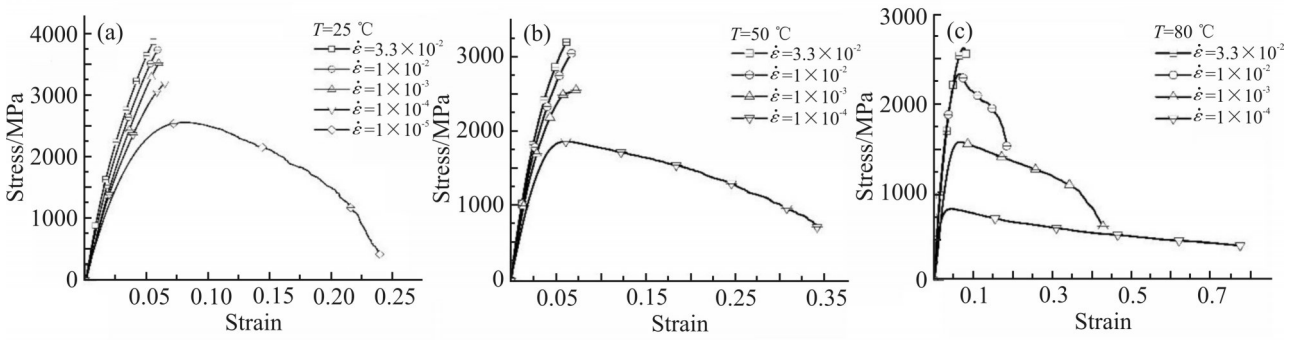


Fig. 4 Stress-strain curves for each strain rate condition at (a) 25 ℃, (b) 50 ℃ and (c) 80 ℃

号的数据代表负增益。由此表可知,相对于25 ℃工况,UHMWPE纤维束各应变率下的拉伸强度在50 ℃时分别下降了41.40%,26.80%,18.50%和17.44%;当温度升至80 ℃时,下降程度分别达到了74.60%,55.32%,37.48%和31.64%,此时UHMWPE纤维束已基本失去抵抗外力的能力。现有文献研究结果表明[4,12],当温度超过70 ℃时,UHMWPE纤维的拉伸强度将急剧下降,本文研究结果与之契合。因此,通过上述分析可以得出结论,无论是单独使用,还是作为复合材料的增强体,在未经特殊处理的情况下,应尽量在50 ℃以下使用,以保证其强度不受明显的负面影响;当工作温度超过50 ℃时,建议对其强度受温度影响的情况进行审慎评估。

在−10~−60 ℃的低温区间内,UHMWPE纤维束各应变率下的拉伸强度在−40 ℃时分别提升了33.01%,20.14%,15.15%和9.20%,具有非常明显的应变率效应。但是,当温度降至−60 ℃时,UHMWPE纤维束各应变率下拉伸强度的提升程度与−40 ℃时基本相同,这表明在此温度时,可以忽略应变率效应对UHMWPE纤维束拉伸强度的影响。因此,通过降低温度来提升UHMWPE纤维束各应变率下拉伸强度的方法是可行的,但当温度低于−40 ℃时,应变率效应对其强度的增益基本消失。

2.2　破坏模式分析

研究发现,UHMWPE纤维束会因加载工况和温度的不同而呈现出2种不同的力学行为和变形特性。一种表现为宏观整体性脆性断裂,另一种则表现为极具韧性且包含蠕变的塑性损伤,二者分别为黏-弹性和黏-塑性主导。

Fig.4(a)~Fig.4(c)分别为25 ℃,50 ℃和80 ℃时各应变率的应力-应变曲线,因研究需要,在Fig.4(a)中额外添加了1组$1\times10^{-5}\ s^{-1}$应变率工况。由Fig.4(a)可知,25 ℃时,UHMWPE纤维束在$1\times10^{-5}\ s^{-1}$应变率下具有非常明显的黏-塑性流动区域,并具有高达0.24的最大应变值,这表明UHMWPE纤维束已经发生了脆-韧性转变,此时其损伤破坏模式为黏-塑性主导的极具韧性且包含蠕变的塑性损伤;对于该温度下其余4种应变率工况,UHMWPE纤维束均在峰值应力处以黏-弹性主导的脆性断裂的方式破坏。进一步分析Fig.4可知,UHMWPE纤维束在50 ℃时脆-韧性转变发生的临界应变率为$1\times10^{-4}\ s^{-1}$;80 ℃时,虽然转变现象在$1\times10^{-2}\ s^{-1}$时初步显现,但曲线的黏-塑性流

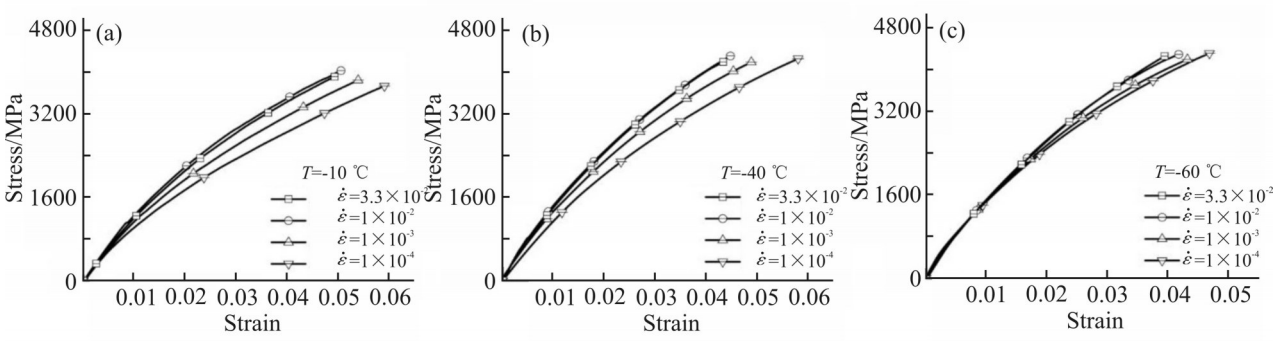


Fig. 5 Stress-strain curves for each strain rate condition at (a)−10 ℃, (b)−40 ℃ and (c) −60 ℃

Tab. 4 Experimental data of failure strain under various conditions %

Temperature/℃	Strain rate/s^{-1}			
	1×10^{-4}	1×10^{-3}	1×10^{-2}	3.3×10^{-2}
−60	4.69	4.32	4.18	3.95
−40	5.56	4.85	4.44	4.29
−10	6.46	5.96	5.87	5.53
25	5.93	5.41	5.07	4.95
50	6.12*	7.28	6.78	6.22
80	4.51*	7.76	6.66	7.51

动区域宽度不够，这表明此时UHMWPE纤维束的黏-塑性特性没有得到充分发挥，因而认为80 ℃时产生脆-韧性转变的临界应变率为1×10^{-3} s^{-1}。由上述分析可知，UHMWPE纤维束在25 ℃，50 ℃和80 ℃时产生脆-韧性转变的临界应变率分别为1×10^{-5} s^{-1}，1×10^{-4} s^{-1}和1×10^{-3} s^{-1}，因此得出结论，UHMWPE纤维束产生脆-韧性转变的临界应变率与温度之间存在密切联系，温度每升高约30 ℃，临界应变率就会提升1个量级。在−10~−60 ℃温度范围内的低温实验中，UHMWPE纤维束的破坏模式均为整体性脆性断裂，各应变率工况的应力-应变曲线见Fig.5。

2.3 失效应变分析

Tab.4为UHMWPE纤维束各工况失效应变的实验数据。表中带有“*”号的数据是塑性变形主导时的失效应变（峰值应力对应的应变），其余数据均为脆性断裂时的失效应变，损伤破坏模式的不同导致无法对表中数据进行统一的分析，因而本文将−60~25 ℃温度范围内1×10^{-4} s^{-1}，1×10^{-3} s^{-1}，1×10^{-2} s^{-1}，3.3×10^{-2} s^{-1}不同应变率工况的失效应变数据归为一类进行分析。

对Tab.4中数据进行纵向和横向分析，分别得到失效应变-温度(Fig.6(a))和失效应变-应变率曲线(Fig.6(b))。如Fig.6(a)所示，UHMWPE纤维束的失效应变随温度的提升呈线性增长趋势，温度效应显著；此外，Fig.6(a)中各线段基本相互平行，说明在−60~25 ℃温度范围内，各应变率工况的失效应变随温度的上升具有相同增长速率，即意味着UHMWPE纤维束失效应变的温度效应基本不受应变率的影响。横向分析表中数据，由Fig.6(b)可知，UHMWPE纤维束的失效应变随应变率的提升而衰减，由微分曲线(Fig.6(c))可以看出各曲线失效应变的衰减速率逐渐趋于稳定，表明在低温环境中，UHMWPE纤维束的应变率效应受到了温度的限制。通过上述纵向和横向分析得出结论，UHMWPE纤维束的力学性能受应变率和温度效应影响，但后者具有更为强大的影响力，在对UHMWPE纤维束的使用过程中，应优先考虑温度条件。此外，UHMWPE纤维束应变率效应的产生可归结于两方

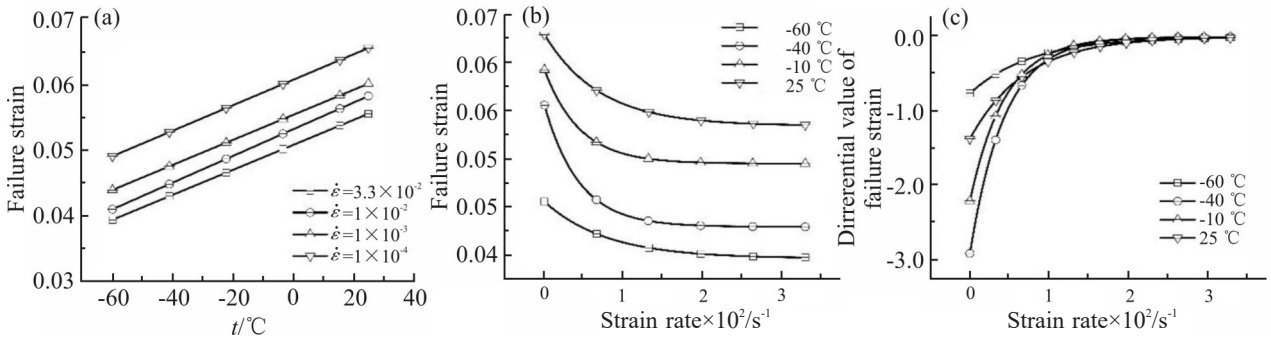


Fig. 6 (a) Failure strain-temperature curves, (b)failure strain-strain rate and (c) differential curves

面:(1)材料黏性[13];黏性越强,应变率效应越显著;(2)共价键的断裂数量[14];材料破坏时,共价键的断裂数量越多,应变率效应越显著。根据本文研究结果,UHMWPE纤维束拉伸强度、失效应变在低温状态下,尤其在-40~-60 ℃范围内,应变率效应被大幅度削弱,所以,低温会降低UHMWPE材料的黏性并提升共价键的断裂概率。最后,通过对比Tab.4中50 ℃和80 ℃时,1×10^{-4} s^{-1}应变率工况下的失效应变可以发现,在塑性损伤主导的拉伸过程中,失效应变随温度的提升而减小,而脆性断裂时的失效应变则随温度的提升而增大,二者具有本质上的不同。

3　结论

(1)UHMWPE纤维束的力学性能具有一定的应变率和温度效应,但后者具备更为强大的影响力,无论是单独使用,还是作为复合材料的增强体,在未经特殊处理的情况下,应尽量在50 ℃以下使用,以保证其强度不受明显的负面影响;此外,低温在提升UHMWPE纤维束拉伸强度的同时也会削弱其力学性能的应变率效应,在-40~-60 ℃范围内,拉伸强度和失效应变的应变率效应基本消失。

(2)UHMWPE纤维束产生脆-韧性转变的临界应变率与温度之间存在密切联系,在25~80 ℃范围内,温度每升高约30 ℃,临界应变率就会提升1个量级;在-10~-60 ℃的低温工况中并未观察到脆-韧性转变现象,所有试样均以脆性断裂的方式破坏。

(3)本文对UHMWPE纤维束温度和应变率协同作用的研究,为探究影响其力学性能和损伤破坏模式的临界工况提供了依据;同时,还为由UHMWPE纤维束构成的纤维增强复合材料的适用工况提供了参考。

参考文献:

[1] 刘磊. 基于纤维增强的船用防护模块抗侵彻性能研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2020.
Liu L. Research on anti- penetration performance of marine protection module based on fiber reinforcement[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2020.

[2] 向东. 超高分子量聚乙烯的应用及改性研究进展[J]. 上海化工, 2005, 30(12):5.
Xiang D. Application and modification research progress of ultra-high molecular weight polyethylene[J]. Shanghai Chemical Industry, 2005, 30(12): 5.

[3] 夏源明, 王镇, 汪洋. 纤维束及其单向复合材料动态力学性能的研究 [C]// 复合材料的现状与发展——第十一届全国复合材料学术会议论文集. 合肥: 中国复合材料学会, 中国航空学会, 中国力学学会, 2000.

[4] Kromm F X, Lorriot T, Coutand B, *et al*. Tensile and creep properties of ultra-high molecular weight PE fibers[J]. Polymer Testing, 2003, 22(4): 463-470.

[5] Coline R, Eric L, Jean- Claude G, *et al.* Study of the thermomechanical behavior of UHMWPE yarns under different loading paths[J]. Polymer Testing, 2020, 89: 106717.

[6] Song B, Casem D, Kimberley J. Tensile properties of Dyneema SK76 single fibers at multiple loading rates using a direct gripping method[J]. Springer International Publishing, 2015, 8: 1-4.

[7] Koh A, Shim V, Tan V. Dynamic behaviour of UHMWPE yarns and addressing impedance mismatch effects of specimen clamps[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37: 324-332.

[8] Fouad H, Mourad A, Barton D C. Effect of pre-heat treatment on the static and dynamic thermo-mechanical properties of ultra-high molecular weight polyethylene[J]. Polymer Testing, 2005, 24: 549-556.

[9] 金宏彬.纤维束冲击拉伸的数值模拟[D]. 上海: 东华大学, 2005: 69-79.
Jin H B. Numerical simulation of tensile impact process for filament yarns[D]. Shanghai: Donghua University, 2005: 69-79.

[10] 辛振, 沈超明, 唐柏鉴, 等. 超高分子量聚乙烯纤维束低速拉伸下的应变率效应及其统计损伤本构关系[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(4): 93-100.
Xin Z, Shen C M, Tang B J, *et al.* Strain rate effect and statistical damage constitutive relationship of ultra-high molecular weight polyethylene fiber bundles under low speed stretching[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39(4): 93-100.

[11] 朱德举,张晓彤,欧云福,等. Kevlar49单丝和单束的随机破坏及有限元模拟[J]. 复合材料学报,2016,33(1): 213-223.
Zhu D J, Zhang X T, Ou Y F, *et al*. Probabilistic failure and finite element simulation of Kevlar 49 single filament and single yarn [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(1): 213-223.

[12] Chukov D, Kharitonov A, Tcherdyntsev V, *et al*. Structure and mechanical properties of self- reinforced ultra- high molecular weight polyethylene[J]. Journal of Composite Materials, 2017, 52: 1689-1698

[13] 薛晓. 碳纳米管纤维的动静态力学性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020: 40-41.
Xue X. Investigation of dynamic and quasi- static mechanical properties of carbon nanotube fibers [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020: 40-41.

[14] Koh C P, Shim V, Tan V, *et al*. Response of a high- strength flexible laminate to dynamic tension[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35: 559-568.

Tensile Mechanical Properties of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Fiber Bundles with Temperature and Strain Rate Effect

Zhen Xin[1,2], Chaoming Shen[1]

(*1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, China; 2. Chengxi(Tai zhou) Equipment Technology Co., Ltd, Taizhou 214514, China*)

ABSTRACT: A preparation method of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fiber bundle samples was designed to effectively prevent fiber pull out and root shear fracture of samples. Based on the experimental data of axial tensile test, the temperature and strain rate effects of mechanical properties of UHMWPE fiber bundles and their failure modes were investigated under 25 kinds of working conditions including temperature (−60~80 ℃) and strain rate (1×10^{-5}~3.3×10^{-2} s^{-1}). The results show that the mechanical properties of UHMWPE fiber bundles have certain strain rate and temperature effects, but the latter has a more powerful influence, which makes the strength of UHMWPE fiber bundles decrease significantly when the temperature is higher than 50 ℃. In addition, low temperature can improve the tensile strength of UHMWPE fiber bundles and weaken the strain rate effect of mechanical properties. In the range of −40 ℃ to −60 ℃, the tensile strength and failure strain of UHMWPE fiber bundles are not affected by strain rate. In the investigation of damage and destruction modes of UHMWPE fiber bundles, it is found that the critical strain rate of brittle-tough transition is closely related to temperature in the temperature range of 25~80 ℃, and the critical strain rate will increase by an order of magnitude every time the temperature increases by about 30 ℃.

Keywords: ultra-high molecular weight polyethylene fiber bundle**;** temperature effect; strain rate effect; brittle-tough transition; critical strain rate